

선박폐열발전의 이론적 투자모델을 적용한 경제성 분석

김세규¹⁾ · 문정현¹⁾ · 김현주²⁾ · 임승택^{1)*}

Economic Analysis Applying a Theoretical Investment Model for Ship Waste Heat Power Generation

Se-Gyu Kim¹⁾ · Jung-Hyun Moon¹⁾ · Hyeon-Ju Kim²⁾ · Seung-Taek Lim^{1)*}

Received 14 April 2026 Revised 12 May 2026 Accepted 2 June 2026 Published online 23 June 2026

ABSTRACT The demand for high-efficiency technologies to prepare for the rapid increase in ships' carbon emissions and fuel costs is rising. The IMO is strengthening regulations on carbon emissions from ships. At the same time, the adoption of eco-friendly fuels such as ammonia or ethane is being delayed due to rising fuel costs and upfront investment costs. In this context, energy conversion technology that utilizes waste heat generated on ships is gaining attention because it is readily accessible, requires low initial investment, and applies to various fuel types and vessel types. This study examined the costs derived from a theoretical initial investment analysis model for a 100 kW-class ship waste heat power generation system currently under development and compared them with the actual calculated costs. The initial cost derived from the theoretical model, approximately \$910,000, was more than 50% higher than the actual cost, due to factors such as national labor and manufacturing costs. However, the power generation model that applied actual costs yielded high results for economic indicators such as the Benefit/Cost ratio, IRR, and NPV, measuring 2.93, 24.4%, and \$440,000, respectively. The applied operating conditions were a power-generation model using LNG fuel and a ship expected to operate for 80% of the year.

Key words Waste heat power generation(폐열발전), Capital costs(초기 투자비), Internal rate of return(내부수익율), Net present value(순현재가치)

Nomenclature

A : heat transfer surface area, m²
B : benefit
C : cost
ORC : organic Rankine cycle

R : discount rate
W : work
Y : year

Subscript

EXP : expander
PP : pump
P : pressure
M : material

- 1) Researcher, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO)
2) Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO)

*Corresponding author: limst@kreiso.re.kr

Tel: +82-33-630-5023 Fax: +82-33-630-5005

1. 서론

전 세계적으로 이산화탄소 배출 증가로 인한 지구 온난화가 가속화되고 있으며, 해운산업은 전체 온실가스 배출의 약 3%를 차지한다. 제4차 IMO GHG Study(2020)에 따르면, 2012년 대비 2018년 선박의 이산화탄소 배출량은 약 9.6% 증가한 것으로 보고 하였다.^[1] 이는 9억 7,700만 톤의 이산화 탄소가 약 10억 7,600만 톤 CO₂상승한 것과 같다. 이에 따라 IMO는 해상 운송의 탄소배출 저감을 위한 규제 체계를 단계적으로 강화하고 있으며, 2023년부터 EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index) 및 CII(Carbon Intensity Indicator) 규제를 시행하여 신조선뿐만 아니라 기존 선박에서도 선박 효율을 강화 하였다. 이 중 EEXI는 선박 설계 단계의 효율지표이며, CII는 운항 중 실질 탄소집약도를 평가하는 지표로, 미달 시 시정조치가 요구된다.^[2]

또한, IMO 정량적 목표로 2030년까지 탄소집약도를 40% 이상 감축, 2050년까지 순배출량을 절반 이하로 줄이는 목표를 제시하며 공격적인 감축 계획을 내세우고 있다. 반면, 전 세계 교역량의 약 85% 이상이 해상 운송에 의존하고 있어, 해운 부문의 탈탄소화는 국제사회에서 필수 과제로 부상하고 있다. 이에 대한 대응 수단으로는 주로 기존 추진기관 효율 개선, 연료 전환(LNG, 암모니아 등), 그리고 폐열

회수(WHR: Waste Heat Recovery) 기술 적용 등이 검토되고 있다.

이러한 규제 환경 변화 속에서 폐열 회수는 비교적 단기적·현실적인 감축 수단으로, EEXI 및 CII 준수뿐만 아니라 선박의 연료비 절감에도 직접 기여할 수 있는 기술이기에 ORC 기반 폐열발전 시스템 시장이 형성되고 점차 확대되고 있다.

2021년 세계 ORC 폐열발전 시장은 Ormat가 주도하고 있으며, 2021년 세계 ORC 폐열발전 시장 점유율은 Ormat가 10.23%, 그 외 대형 기업이 약 1~3%의 점유율을 보이고 있다. 기타 중소형 기업이 무려 77% 이상을 차지하고 있어 Ormat을 제외하고는 뚜렷한 시장 독점이 없는 상황이다.^[3] ORC 기술이 사용화되는 만큼 성능뿐만 아니라 경제성을 중요시하는 연구도 선행되었다. Lei Li 등은 ORC 폐열발전의 구성 요소별 비용을 분석하고 경제성을 분석하는 연구를 수행하였다. 신규 개발된 선박 폐열발전은 개발된 제품의 성능과 초기 비용 및 운용 비용 등을 고려하여 시장 진입이 필요하며, 경제성을 사전 분석하여 시장 경쟁력을 파악해야 한다. 본 논문에서 적용된 이론적 비용 산정은 초기 제품을 개발하는 과정에서 초기 비용을 추정 할 수 있는 방안으로 활용된다. 이를 통해 신규 개발하고자 하는 선박 폐열발전이 발전 규모에 따른 경제성을 분석하고자 한다. Fig. 1는 폐열을 활용한 ORC 발전 사업자의 국제 시장 점유율이다.

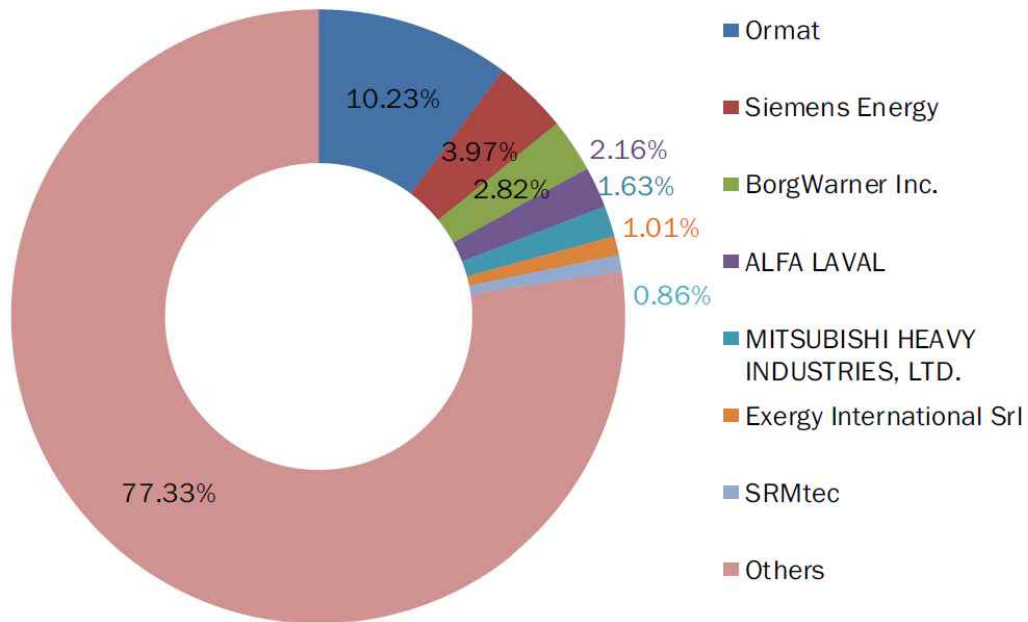


Fig. 1. 2021 global market share of ORC-based waste heat power generation

2. 경제성 분석 범위 및 기초 모델

경제성 분석을 위해 개발 용량과 용량에 따른 초기 투자 비용 도출이 선제적으로 필요하다. 일본과 유럽에서 주로 개발 중인 선박 폐열 발전 장치는 선박의 용량에 따라 100 kW급에서 200 kW급으로 분류되며, 최근 국내에서 개발 되고 있는 발전 모델의 경우 250 kW급 모델이 있다. 본 논문에 적용된 폐열 발전은 중소형 외항선에 적용가능한 100 kW급 발전 모델을 기준으로 제안되었으며, 초기 투자 비용을 도출하였다.

2.1 100 kW급 선박폐열발전 설계

선박폐열발전에서 적용된 ORC 발전 모델은 기본적인 사이클 구조로 170°C, 0.555 kg/s의 버려지는 스팀을 이용하여 총 120 kW의 발전 출력을 보인다. 이때, 냉각수는 약 30도로 51.0 kg/s가 공급되며, 각각의 열원과 열침의 온도차는 20°C와 5°C이다.

냉매는 4.44 kg/s로 공급되며, 증발기 열량은 1,187 kW이며 효율은 약 10.11%에 달한다. 터빈의 효율은 80% 적용하였으며, 펌프는 70%를 적용하였다. Fig. 2는 선박폐열발전의 계략도이다.

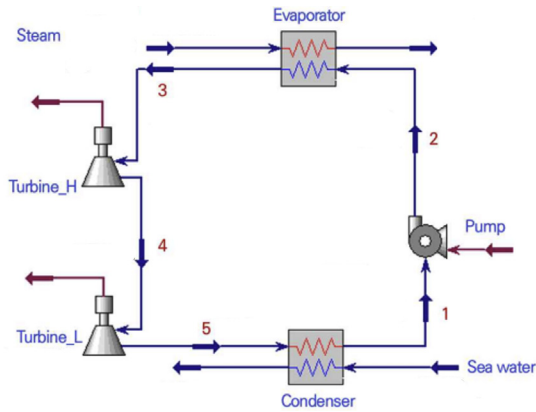


Fig. 2. Schematic diagram of ship waste heat power generation

2.2 100 kW급 선박폐열발전 Cost & Benefit 분석

2.2.1 선박폐열발전 초기 투자비 분석 요소

초기 설비를 구축하고 설계와 제작에 진행되기 위하여 기업은 예상되는 비용과 주요 항목을 이론에 근거하여 산

출한다. 이와 같은 이론적 산출 결과는 지역의 제조 능력과 인건비, 재료 비용 단가 등의 다양한 영향을 고려할 수 없으나 각 요소의 지출 비율과 향후 경제성 분석의 초기 데이터로 사용된다.^[4,5]

비용 산출을 위해서는 설비의 규모와 적용 소재, 설비의 타입 등이 적용되며, 정확한 모델 선정이 실제 비용과 밀접하게 연결된다. 초기 모델에 대한 비용 산정 모델은 Richard Turton 등이 저술한 화학 공정 설비의 비용 산정 모델을 근거로 제안한다.^[8]

선박폐열발전의 주요 설비는 터빈과 냉매 펌프, 그리고 증발기와 응축기로 나뉘며, 기타 밸브와 배관 설비는 기타 비용으로 가정하였다. 이때, 적용된 열교환기는 쉘 앤 튜브형 열교환기로 스팀을 열교환하는 증발기는 전열 면적이 4.9 m², 냉각수와 열교환하는 응축기는 46.8 m²를 적용하였다. 펌프 압력은 22bar 출력은 15 kW이며, 터빈 최대출력은 정격의 120%를 적용하여 120 kW를 모델을 구성하였다. 그러나 실제 발전은 평균 100 kW를 적용하였다.

열교환기, 터빈, 펌프의 이론적 계산식은 아래 식 (1)에서 (8)에 나타난다. 여기서 C는 비용 F는 요소, B는 종류를 의미하며, BM은 총괄 요인이며, m은 재질, p는 압력을 의미한다. A는 면적이며, W는 출력을 의미한다. 이때, K₁, K₂, K₃과 C₁, C₂, C₃은 각각 회기 상수이다.

1) 열교환기

$$C_{BM} = C_p \times F_{bm} = C_p \times (B_1 + B_2 \cdot F_m \cdot F_p) \quad (1)$$

$$\log C_p = K_1 + K_2 \cdot \log A + K_3 \cdot (\log A)^2 \quad (2)$$

$$\log F_p = C_1 + C_2 \cdot \log P + C_3 \cdot (\log P)^2 \quad (3)$$

2) 터빈

$$C_{BM} = C_p \times F_{bm} = C_p \times (B_2 \cdot F_m \cdot F_p) \quad (4)$$

$$\log C_p = K_1 + K_2 \cdot \log W_{exp} + K_3 \cdot (\log W_{exp})^2 \quad (5)$$

3) 펌프

$$C_{BM} = C_p \times F_{bm} = C_p \times (B_1 + B_2 \cdot F_m \cdot F_p) \quad (6)$$

$$\log C_p = K_1 + K_2 \cdot \log W_{pump} + K_3 \cdot (\log W_{pump})^2 \quad (7)$$

$$\log F_p = C_1 + C_2 \cdot \log P + C_3 \cdot (\log P)^2 \quad (8)$$

2.2.2 선박폐열발전 이익 분석 요소

선박 폐열발전을 통해 확보되는 소득은 경제성 분석의 기초가 된다. 그러나 일반적인 육상의 발전 설비와 달리 선박은 연료의 대체 방식에 따라 경제성 결과가 다르게 반영된다. 또한, 선박의 연간 운항률과 발전기 운전 부하에 따라 도출되는 이익 구조가 다양하다.

본 설비는 약 70 또는 80%를 운항하는 선박의 80%로 운전되는 발전기를 100 kW 대체하며, 연료별 단가는 HFO, MDO, LNG를 비교하였다. 선박폐열발전의 초기 비용 분석 요소와 이익 구조는 Table 1과 같다.

2.3 선박폐열발전 경제성 분석 요소

2.3.1 경제성 분석 절차

경제성 분석을 위하여 초기 투자 항목을 분석하고, 이익 구조를 분석하며, B/C ratio 분석을 통해 경제성 창출을 위한 사전 타당성을 분석한다. B/C ratio이 1 이상의 결과값

에 대한 NPV 분석 수행하여 0 이상의 수익 값이 나오는 운전조건을 갖는 모델에 대한 IRR 분석 최소 5.5% 이상의 모델에 대한 경제성을 비교 분석하였다.^[9] Fig. 3은 경제성 분석 절차이다.

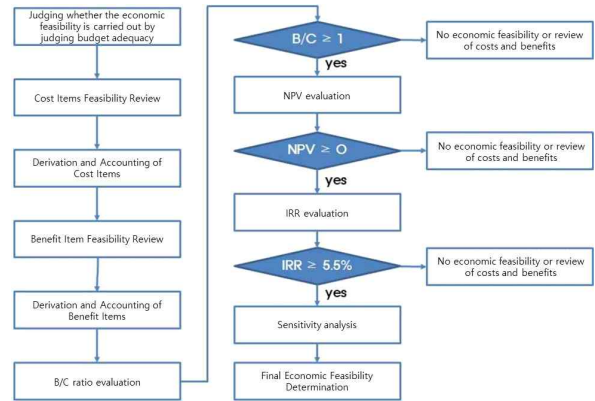


Fig. 3. Economic analysis procedure for marine waste heat recovery systems

Table 1. Operational Conditions for Capital Expenditure and Revenue Estimation in Marine WHRS

Specific Cost List			
Type	Value	Unit	Remarks
Turbine maximum capacity	120	kW	120% of rated capacity
Turbine material	SUS304		-
Condenser heat transfer area	46.8	m ²	-
Evaporator heat transfer area	4.9	m ²	-
Condenser pressure	2.4	bar	Manufacturer specification
Evaporator pressure	22	bar	Manufacturer specification
Heat exchanger material	SUS304		-
Heat exchanger type	Shell & Tube		Manufacturer specification
Pump capacity	15	kW	120% of rated capacity
Pump pressure	22	bar	-
Specific Benefit List			
Power output	100	kW	Average power output
Annual generator operating rate	70, 80	%	Based on container ships A and B ^[6]
Fuel cost	658.5	USD/Ton	HFO ^[7]
	847.3	USD/Ton	MDO ^[7]
	287.68	USD/Ton	LNG ^[7]
Generator efficiency	50	%	Diesel generator basis ^[6]
Energy density	11.2	kWh/kg	HFO
	11.9	kWh/kg	MDO
	13.3	kWh/kg	LNG
Generator operating load	80	%	Load factor = 1

* Operating conditions of the generator on an actual voyage container ship.

2.3.2 경제성 분석 모델

선박폐열발전의 투자비와 이익을 바탕으로 경제성 분석은 아래 식 (9)에서 (11)까지의 이론식을 바탕으로 분석되었다. 여기서 r 은 이율, y 는 연수를 의미하며, C 는 지출, B 는 이익을 의미한다.

1) B/C ratio 분석

$$(B/C \text{ ratio}) = \frac{\sum_{y=y_0}^n B_y / (1+r)^y}{\sum_{y=y_0}^n C_y / (1+r)^y} \quad (9)$$

2) NPV 분석

$$NPV = \sum_{y=y_0}^n B_y / (1+r)^y - \sum_{y=y_0}^n C_y / (1+r)^y \quad (10)$$

3) IRR 분석

$$\sum_{y=y_0}^n B_y / (1+R)^y - \sum_{y=y_0}^n C_y / (1+R)^y = 0 \quad (11)$$

3. 발전 규모에 따른 비용 분석

3.1 이론적 발전 모델의 비용 분석

이론 모델을 바탕으로 선박폐열발전의 구성 요소별 제작 단가를 비교하고 전체 소요 비용을 분석하였으며, 적용 설비는 터빈, 펌프, 증발기, 응축기 및 부대비용으로 분류되었다. 물가 상승에 따른 제작 비용 산출을 위하여 CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index)를 적용하여 비용 분석하였으며, 실제 제작된 선박폐열발전의 제작 단가는 약 \$ 911,000로 예상되며, 각 요소별 예상 비율은 터빈 32%, 응축기 13%, 증발기 11%, 펌프 3%이며, 그 외 부대 비용이 41%가 될 것으로 예측되었다. Fig. 4는 이론적 모델로 도출된 초기 투자 비용 분포이다. 이론적 모델의 타당성을 분석하기 위하여 국내 제작된 동일 용량의 선박폐열발전의 비용을 확보하여 비교하였다. 확보된 비용은 \$ 458,000으로 이론 모델의 50%이었으며, 이와 같은 비용 차이는 국내의 낮은 인건비와 제작 비용으로 예상된다.

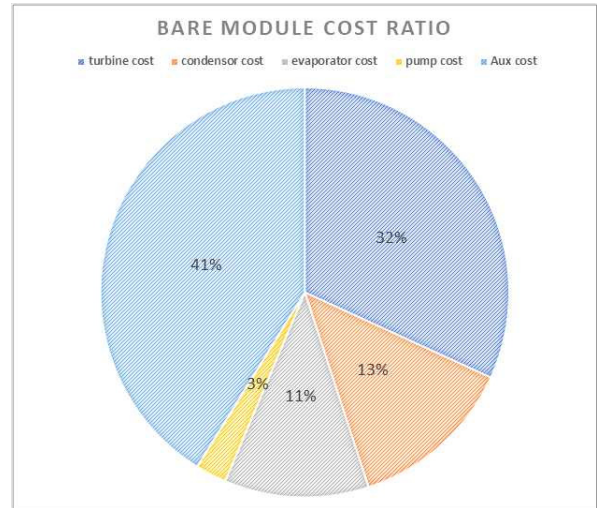


Fig. 4. Capital expenditure distribution of theoretical power generation models

3.2 운전에 따른 소득 분석

선박에 선박폐열 발전을 적용할 경우 엔진의 폐열이 발생하는 운항 중에만 활용 가능하며, 24시간 운전을 적용하였다. 발전기 엔진의 연료 밀도에 따른 효율은 문헌을 참고하여 50%로 산정하였고 가장 경제성이 높은 80%의 부하로 운전하는 것을 가정하였다. 연료별 단가는 각각 HFO : 658.5 USD/Ton, MDO : 847.3 USD/Ton, LNG : 287.7 USD/Ton의 25년 7월 국제 유가를 적용하였다. 이는 국제 선박 연료의 월평균 비용 단가이다.^[7] LNG 연료를 적용한 모델에서 연간 약 \$ 60,000의 소득을 보이며, MDO에서는 최대 \$ 110,000에 달한다. 일반적으로 HFO를 사용하는 선박에서 80% 운항 조건을 만족해야 5.6년의 투자 기간을 보인다. Fig. 5는 연료 및 운항 조건에 따른 순이익 분포이다.

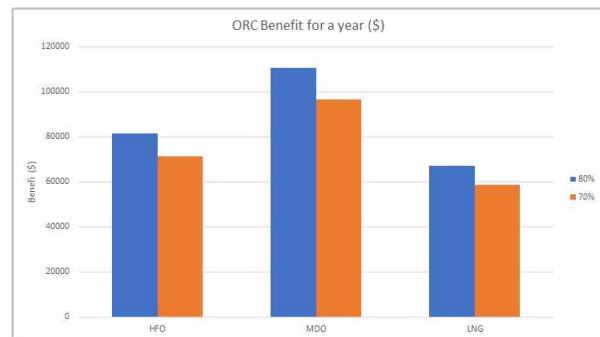


Fig. 5. Revenue analysis by operational models and fuel types for marine waste heat recovery systems

4. 경제성 분석 결과

4.1 B/C ratio 분석 결과

B/C ratio는 초기 투자 비용과 운영 비용을 20년 운전연수로 가정하여 수익과의 비율을 분석하였으며, 연료의 조건에 따라 1 이상의 초기 투자대비 수익 비율을 확보한 모델에서 경제성이 확보된다. 이론적 분석 모델에서는 MDO로 운전된 선박에서 1.21의 값을 확보하였으나 HFO와 LNG 연료 선박에서는 각각 0.9와 0.74의 값을 보여 경제성이 낮았다. 반면 실제 제작 비용을 적용한 분석 모델에서는 연료에 상관 없이 2 이상의 결과 값을 갖으며, HFO, MDO 및 LNG에서 각각 3.56, 4.82 및 2.93를 보였다. Fig. 6은 이론 모델과 실제 비용의 B/C ratio 분석 결과이다.

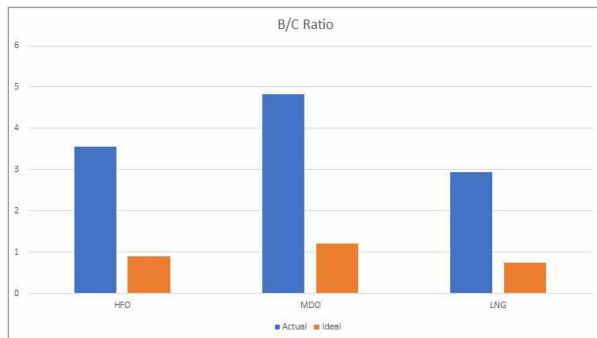


Fig. 6. Benefit-cost (B/C) analysis of theoretical and empirical models by fuel type

4.2 NPV 분석

NPV는 선박폐열발전이 20년의 운영 기간 중 얻게 되는 총소득을 분석한 것으로 제작에 소요되는 이윤을 반영하였다. 문헌을 바탕으로 적용 이윤은 5.5%를 반영하였으며, 선박 조건에 따라 운항율 70%와 80%를 적용하고 B/C 분석과 동일하게 3가지의 연료 타입을 적용하였다.^[7] 80%의 운항 모델에서 MDO로 운전되는 선박에서 선박폐열발전을 적용한 경우 약 \$ 953,000의 순익이 발생할 것으로 예상

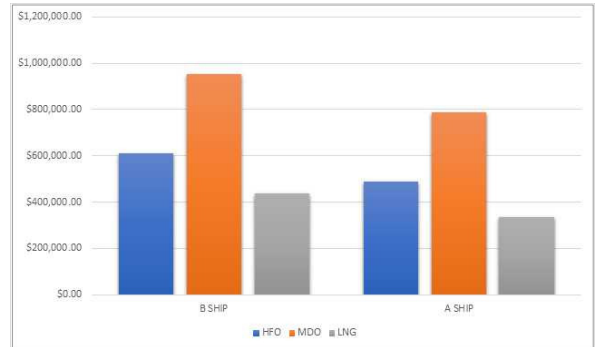


Fig. 7. NPV analysis of theoretical vs. empirical WHRS models based on fuel variations

되며, LNG의 경우 약 \$ 440,000의 순익을 확인하였다. 반면, 70%의 운전조건에서 LNG를 사용한 선박의 경우 \$ 336,700의 소득의 최저점이 예상된다. Fig. 7은 선박폐열발전의 NPV 분석 결과이다.

4.3 IRR 분석

IRR은 선박폐열발전이 개발에 필요한 최대 이윤 조건으로서 이를 초과하는 이윤 조건에서는 개발 순익이 0이 됨을 의미한다. 높은 이윤은 높은 수익률을 의미하며, 본 설비를 개발하기에 초기 투자 범위를 선정할 수 있게 된다. 80%의 운항 모델에서 MDO로 운전되는 선박에서 선박폐열발전을

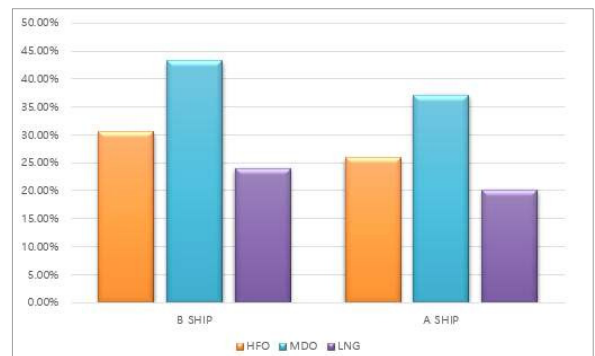


Fig. 8. Comparative IRR analysis between theoretical and empirical models considering fuel types

Table 2. Economic indicators for 70% and 80% operating conditions

Operation rate	80%			70%			
	Fuel	HFO	MDO	LNG	HFO	MDO	LNG
IRR		30.92%	43.93%	24.31%	25.92%	37.13%	20.14%
NPV		\$613,308.11	\$953,998.61	\$440,242.56	\$487,536.43	\$789,024.79	\$336,702.26

적용한 경우 약 43.2%의 이윤이 예상되며, LNG의 경우 24.3%를 나타내었다. 70%의 운전조건에서 LNG를 사용한 선박의 경우 20.1%의 이윤이 예상된다. Fig. 8은 운항 조건에서의 IRR 분석 결과이며, Table 2는 70%와 80% 운항 조건의 경제성 지표이다.

5. 결론

본 연구를 통해 선정된 100 kW급 선박폐열발전의 설계 모델을 기준으로 이론 모델의 타당성을 분석하였으며, 제작 환경, 인건비 등의 산업 구조가 포함되지 않는 이론 모델은 실제 비용과의 차이가 높은 것으로 확인되었다.

따라서 이론 모델에서는 수익 구조가 낮아 MDO의 높은 연료 비용의 조건을 제외하면 B/C 비율이 1 이하로 낮으며 제작 금액을 적용해야 B/C = 1 이상의 지표를 보인다.

실제 비용을 적용한 경우, 현재 가장 널리 사용되는 HFO 연료를 저감하는 모델에서도 \$ 487,000 이상의 NPV를 보이나 향후 LNG 연료가 증가 되면서 \$ 336,000 정도를 보일 것으로 예상된다. 선박폐열발전의 상용화를 위해서 개발비용 감소와 수익 증대 모델을 구성 할 필요가 있으며, 발전 용량 증가를 통해 수익 증대 방안이 필요하다.

본 연구를 통해 도출된 이론적 발전 모델은 저용량 선박폐열발전의 초기 비용 산출의 지표로 적용 가능하며, 초기 경제성 분석 결과로서 제안되었다. 향후 항로, 운항 조건 등의 민감도 분석을 통한 고도화된 분석 결과를 도출 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220634, 친환경경선박 전주기 핵심 기술개발 사업).

References

[1] International Maritime Organization (IMO), 2021, “Fourth IMO GHG Study 2020”, <https://wwwcdn.imo.org/local>

[resources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf).

- [2] International Maritime Organization (IMO), 2021, “Amendments to the annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto”, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328(76).pdf).
- [3] Data Bridge Market Research, 2022, “Global Organic Rankine Cycle (ORC) Waste Heat to Power Market - Industry Trends and Forecast to 2029”, Accessed 14 April 2026, https://www.databridgemarketresearch.com/reports/north-america-organic-rankine-cycle-orc-waste-heat-to-power-market?srsltid=AfmBOorlvym3cTwT8m4SK-KisLWIIMGSNwwKD4BXW_0dyxC1zgDL3TGm.
- [4] Li, L., Tao, L., Li, Q., and Hu, Y., 2021, “Experimentally economic analysis of ORC power plant with low-temperature waste heat recovery”, *Int. J. Low-Carbon Technol.*, **16**(1), 35-44.
- [5] Lim, T.-W., Choi, Y.-S., and Hwang, D.-H., 2021, “Optimal working fluids and economic estimation for both double stage organic Rankine cycle and added double stage organic Rankine cycle used for waste heat recovery from liquefied natural gas fueled ships”, *Energy Convers. Manag.*, **242**, 114323, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114323>.
- [6] Yoon, J.-W., Lee, H.-S., Kim, S.-G., and Lim, S.-T., 2025, “Analysis of on-ship organic Rankine cycle and energy storage system as a replacement of diesel generators for reducing carbon emissions”, *J. Mech. Sci. Technol.*, **39**, 7137-7151, <https://doi.org/10.1007/s12206-025-1051-2>.
- [7] Ship & Bunker, 2026, “World Bunker Prices”, Accessed 14 April 2026, <https://shipandbunker.com/prices>.
- [8] Turton, R., Shaeiwitz, J.A., Bhattacharyya, D., and Whiting, W.B., 2018, “Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes”, 5th ed., Pearson Education, Boston.
- [9] Lim, S., Lee, H., Moon, J., and Kim, H., 2020, “Simulation data of Regional Economic Analysis of OTEC for Applicable Area”, *Processes*, **8**(9), 1107, <https://doi.org/10.3390/pr8091107>.